第 37 卷第 8 期
2017 年 4 月
生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA
Vol.37,No.8
Apr.,2017

DOI: 10.5846/stxb201510102045
刘海,殷杰,林苗,陈晓玲.基于 GIS 的鄱阳湖流域生态系统服务价值结构变化研究.生态学报,2017,37(8):2575-2587.
Liu H, Yin J,Lin M, Chen X L.Sustainable development evaluation of the Poyang Lake Basin based on ecological service value and structure analysis.Acta Ecologica Sinica,2017,37(8):2575-2587.

基于 GIS 的鄱阳湖流域生态系统服务价值结构变化研究

刘 海[1,2],殷 杰[1],林 苗[1],陈晓玲[3,*]

1 湖北大学资源环境学院,武汉 430062
2 区域开发与环境响应湖北省重点实验室,武汉 430062
3 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,武汉 430079

摘要:鄱阳湖作为中国最大的淡水湖,国际重要湿地,其生态环境保护与可持续发展意义重大。基于生态系统服务价值分析方法,以鄱阳湖全流域为研究区,利用 1990 年、2000 年、2008 年 3 个时期数据,分别从全流域与子区域两个层次,计算了生态系统服务价值。并且基于威弗(Weaver)组合指数,求出了鄱阳湖各子流域的生态系统服务价值结构与坡度结构类型。分析表明,鄱阳湖流域在 3 个时期生态系统服务价值量持续增大,全流域的可持续性向有利的方向发展。在各子区域中,大部分区域生态系统服务价值较高,可持续发展水平较好,且呈现良性发展趋势,但是在鄱阳湖流域的中部地区生态系统服务价值较低,可持续发展水平较差,且呈现不良发展趋势。鄱阳湖流域的生态系统服务价值组合结构以林地、农用地、水体 3 类为主,且单重结构类型所占比例最大,双重结构类型与三重结构类型次之;坡度类型以小于 15°的组合类型为主,结构类型除三重结构类型外,其它类型分布均较多。促进流域可持续发展向更高水平发展,在全流域角度,应该继续执行退耕还林、还湖工程,严格控制建设用地的增加;从子区域的角度,对鄱阳湖流域的中部地区应该控制建设用地与农用地对林地、草地的占用,严格执行退耕还林、还草工程。从生态系统服务价值结构角度,对于山地丘陵区,应该加大对生态环境的维护,并且合理的发展林业经济以促进经济发展;对于环鄱阳湖平原区,应该推进资源消耗少,污染排放小,高科技产业,促进湖区生态环境保护与社会经济的协调发展。

关键词:GIS;生态系统服务价值;生态系统服务价值结构;鄱阳湖流域;可持续发展

Sustainable development evaluation of the Poyang Lake Basin based on ecological service value and structure analysis

LIU Hai[1,2], YIN Jie[1],LIN Miao[1], CHEN Xiaoling[3,*]

1 *Faculty of Resources and Environmental, Hubei University, Wuhan* 430062, *China*
2 *Hubei Key Laboratory of Regional Development and Environmental Response(Hubei University), Wuhan* 430062, *China*
3 *State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan* 430079, *China*

Abstract: As the largest freshwater lake in China and a wetland of international importance, the Poyang Lake Basin has received considerable attention from the international scientific community; therefore, research on the ecological environmental protection and sustainable development of Poyang Lake Basin is of great importance. In this paper, based on ecosystem service value analysis, taking the entire Poyang Lake basin as the study area and using data from 1990, 2000, and 2008, the value and per unit area value of ecosystem services were calculated from the whole and the sub-region. In addition, based on the Weaver composite index, the ecological service value structure and slope structure of each sub-basin in the Poyang lake basin were calculated. Analysis revealed that the ecosystem service value of Poyang Lake Basin continues

基金项目:2015 测绘地理信息公益性行业科研专项项目(201512026);江西省重大生态安全问题监控协同创新中心专项项目(JXS-EW-08)
收稿日期:2015-10-10; **网络出版日期:**2016-10-29

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: xiaoling_chen@whu.edu.cn

to increase over the three periods, and that the sustainability of the entire area is driven in a positive direction. In each sub-area, most of the area has a higher ecosystem service value per unit area; the level of sustainable development is also better, and it showed a positive trend. These regions have a high ratio of forest, water, and construction land, and low ratio of cultivated land to unutilized land. However, the ecosystem service value per unit area in the central region of the Poyang Lake Basin is lower, and the level of sustainable development is lower and it shows a negative trend. These regions have a high ratio of cultivated land to construction land, and a low ratio of forest to grass. In order to promote the sustainable development of the basin, engineering strategies for returning cultivated land to forest and returning cultivated land to lake should be implemented, and the increase in construction land area should be strictly controlled, especially the conversion of farmland to construction land. The lake and forest regions of the Poyang lake basin could potentially be restored through these measures. As for the sub-regions, it should control the construction land and the cultivated land to occupy the forest and grass, and engineering strategies for returning cultivated land to forest and returning cultivated land to grass should be implemented. These measures would aid in the protection of the ecological environment of the Poyang Lake Basin.

Key Words: GIS; ecosystem service value; structure of ecosystem services value; Poyang Lake Basin; sustainable development

生态系统服务价值是指通过生态系统的结构、过程和功能直接或间接提供的生命支持产品和服务,包括人类生活所必需的生态产品和保证人类生活质量的生态功能两部分。生态系统服务价值研究是生态系统可持续性研究的热点之一[1-3]。20 世纪 70 年代,Westman 提出了“自然的服务”概念及其价值评估的概念,90 年代,Daily 及 Constanza 等总结了国际上已有的生态系统服务价值评估的研究成果,将全球生物圈分为 16 种生态系统类型,并将生态系统服务分为不同类型,首次对全球生物圈生态系统服务价值进行了估算[4]。近年来,随着全球生态环境问题的加剧,对生态系统服务价值的研究越来越受到关注[5-7]。国内外众多学者分别从多种尺度对生态系统过程、服务功能的维持、服务功能对区域的影响等多个方面做了研究[8-16]。国内外众多学者从多个方面对生态系统服务价值做了研究,但是,对区域生态系统服务价值结构则较少。在本研究中,将特定区域内,一定地域分异规律下的各种生态环境类型面积所贡献的生态系统服务价值占区域生态服务总价值的比重定义为区域生态系统服务价值结构。区域生态系统服务价值结构,兼有价值与结构双重特征,传统的地理分析方法多是基于地表事物或现象某一方面的特性进行分析,对于多重特性分析存在不足。

本研究选择鄱阳湖流域为研究区,2009 年 12 月 12 日,国务院正式批准《鄱阳湖生态经济区规划》,鄱阳湖作为中国最大的淡水湖泊,是目前长江中下游仅存的 3 个大型通江湖泊之一。季节性的洪水、周期性的湖水更换,典型的洲滩湿地,丰富的生物多样性,以及悠久的人文历史,使鄱阳湖作为一个人地交互作用显著的动态湖泊,受到世界自然基金会(World Wide Fund for Nature,WWF)等国际组织的广泛关注,对鄱阳湖及其流域水环境的监测与保护也成为国际科学界关注的焦点。

在鄱阳湖流域,对生态系统服务价值结构变化的研究目前还较少,仅有少数学者以鄱阳湖流域部分区域为研究区,估算了湿地、森林、农田等土地利用类型的生态系统服务价值[17-19]。本文将以整个鄱阳湖流域为研究区,在空间信息技术的支持下,获取各种土地利用类型的生态系统服务价值,并且利用威弗组合指数计算鄱阳湖流域的生态系统服务价值结构;通过比较分析各个时期流域内各区域的生态系统服务价值以及生态系统服务价值结构的组成及差异,评估鄱阳湖流域可持续发展状况。

1 生态系统服务价值估算

1.1 研究区确定与土地利用信息提取

鄱阳湖流域跨多个经纬度带,流域内不同地方所处自然环境与社会经济发展状态存在较大差异,故全流域的生态系统服务价值并不能全面的反映流域内各区域生态系统服务价值的特征,为了更准确的反映流域内不同区域生态系统服务价值变化特征,这里基于 DEM 数据,将鄱阳湖全流域划分为 45 个子流域,从全流域的

角度与子流域的角度分别展开研究。

生态系统服务价值的计算,首先需要提取各研究区的各种土地利用类型的面积。土地资源分类系统采用中国科学院资源科学数据中心的分类标准,将土地利用分为 6 个一级类:农用地、林地、草地、水域、建设用地、未利用土地。各研究区土地利用类型的信息,是利用 1990 年 TM 影像、2000 年 ETM+影像、2008 年 HJ 影像 3 个时期的遥感数据,通过归一化植被指数与非监督分类结合,并借助 DEM 数据与其它更高分辨率的遥感数据,边界矢量数据,综合解译处理后获取,提取精度 1990 年,2000 年为 79.8%,2008 年的为 82.4%[20-21]。

1.2　生态系统服务价值估算

生态系统服务价值估算,当前应用最广的为 Costanza 估算方法,其计算公式如下:

$$ESV = \sum_{i=1}^{n} (S_i \times VC_i) \tag{1}$$

式中,ESV 为生态系统服务价值总量(当量), S_i 为研究区第 i 类土地利用类型面积(hm^2); VC_i 为第 i 类土地利用类型的单位面积生态系统服务价值(当量/hm^2); i 为土地利用类型

Costanza 方法中,土地利用类型的单位面积生态系统服务价值主要反映的是欧美发达国家的经济水平,在中国应用中存在一些缺陷,为了能更准确的评估鄱阳湖流域各地区各土地利用类型的生态系统服务价值,本文参考中科院地理所谢高地等有关专家,以 Costanza 方法为基础,对中国多位具有生态学背景的专业人员进行问卷调查,得出的生态系统服务评估当量体系[22]和修正单位面积生态系统服务价值当量表[23],此外,考虑到生态系统服务价值的变化具有时间和空间效应,本文在借鉴已有研究方法的基础上,采用研究区相应年份农田粮食单位面积产量与全国农田粮食单位面积产量的比值作为地区逐年修订系数,同时参考江西省植被、草地和农用地 NPP 水平[24-26],将“中国生态系统单位面积生态服务价值当量表”修订为“江西省生态系统单位面积生态服务价值当量表”(表 1)。

表 1　江西省生态系统单位面积生态系统服务价值当量表

Table 1　Per unit area ecosystem services value equivalent of Jiangxi province

土地利用类型 Landuse type	林地 Forest	草地 Grassland	农用地 Farmland	湿地 Wetland	水域 Water	荒漠 Desert
生态系统服务价值当量 Ecosystem services value equivalent	25.57	15.68	10.25	54.77	45.35	1.39

* 江西省 1 个生态系统服务价值当量因子的经济价值量 1990 年 424.9 元/hm^2,2000 年为 432.8 元/hm^2,2008 年为 496.5 元/hm^2

新的生态系统服务评估单价体系包含的 6 种土地利用类型中,其中 5 种土地利用类型与本研究分类解译的土地利用类型相一致,存在差异的分类解译的土地利用类型包括建设用地与未利用土地,新的生态系统服务评估单价体系中只包含有荒漠,鉴于鄱阳湖流域的未利用地主要为裸地,而裸地、城乡工矿居民用地的生态系统服务价值与荒漠较为相近,故这里以新的生态系统服务评估单价体系中荒漠的生态系统服务价值当量作为未利用地与建设用地的估算标准。

以提取的研究区各土地利用类型面积,结合新的生态系统服务评估单价体系,求得鄱阳湖流域不同土地利用类型的生态系统服务价值,如表 2。

表 2　鄱阳湖流域生态系统服务价值(亿元)

Table 2　Ecosystem service value of Poyang lake basin

土地利用类型 Landuse type	1990	2000	2008	土地利用类型 Landuse type	1990	2000	2008
农用地 Farmland	193.48	183.08	179.17	林地 Forest	906.85	954.17	1155.25
草地 Grassland	113.99	110.72	131.73	建设用地 Construction	1.77	2.66	4.10
水体 Water	78.44	94.62	120.16	湿地 Wetland	57.49	33.08	39.95
未利用地 Unused land	2.35	2.45	1.83	合计 Total	1354.38	1380.78	1632.19

基于各流域生态系统服务价值结合流域面积,处理得到各流域单位面积生态系统服务价值,如表 3。

表 3 单位面积生态系统服务价值/(万元/hm^2)

Table 3 The per unit area value of ecosystem services

流域名称 Basin name	1990	2000	2008	流域名称 Basin name	1990	2000	2008
白塔河流域	8922	9201	11274	赣江上游区	7902	8169	9233
昌江流域	9429	9430	11017	赣江万安段	8358	7274	9767
丰溪河流域	7787	8347	9099	赣江峡江段	8344	8894	9750
抚河上游区	9017	9294	10537	赣江下游区	7606	8614	8887
抚河下游区	7401	6822	8648	贡水上游区	8544	9378	9985
抚河中游区	7317	6370	8551	贡水下游区	8174	8676	9551
赣江丰城段	5984	8523	6992	孤江流域	9321	9378	10892
赣江吉安段	6295	8306	7335				
禾水流域	8797	8676	10279	梅江上游区	8941	8617	10447
锦江流域	7532	7772	8801	梅江下游区	8132	8317	9503
濂江流域	9361	9458	10938	绵江流域	9453	8822	10545
潦河流域	8250	9492	9640	平江流域	7886	8086	9214
临水流域	9117	9775	10653	鄱阳湖流域	13071	12613	15273
洪门水库流域	9852	9297	11512	琴江流域	9116	8647	10652
龙泉河流域	9146	8804	10688	饶河流域	8848	8852	10338
泸水流域	8810	8656	10295				
上犹江水库流域	8681	8972	10144	信江中游区	7434	7870	8687
遂川江流域	7016	8569	10105	修水上游区	8814	8884	10300
桃江流域	8669	9150	10129	修水下游区	8774	9339	10252
乌江流域	8306	8682	9706	修水中游区	9064	9398	10592
武宁水流域	9478	9426	11075	崇仁河流域	7415	8188	8456
湘水流域	9177	9450	10724	袁水流域	7897	7860	9228
信江上游区	7674	8286	8968	章水流域	8279	8590	9674
信江下游区	7926	7993	9261	全流域	8546	8712	10299

以表 3 中各子流域单位面积生态系统服务价值,比较分析得到各子流域 3 个时期生态系统服务价值变化图(图 1)。

2 生态系统服务价值结构估算

本文采用威弗组合指数计算鄱阳湖流域的生态系统服务价值结构,威弗(Weaver)组合指数是将实际分布与相应的假设分布相比较,以求得一个最接近的近似分布,对解决含有几个要素的分布问题具有优势[10-11]。

2.1 组合结构类型假设比例分布矩阵构建

生态系统服务价值组合结构类型的求取过程是按实际生态系统服务价值类型的组合比例与某种相应假设的判定比例比较后得到,因此,必须计算实际的 6 种生态系统服务价值类型的组合比例,并对所求得的一组数值按照由大到小的顺序构成相应的指数序列。本研究以子流域为基本单元,计算子流域内 6 种不同土地利用类型的生态系统服务价值占子流域总生态系统服务价值的比例 T_{ij},并按从大到小顺序排列:T_{i1},T_{i2},…,T_{i6}。

建立组合结构类型假设比例分布矩阵:为确定子流域的生态系统服务价值组合结构类型的实际类型,还需要按生态系统服务价值类型组合的假设百分比分布来构建相关矩阵,从而对生态系统服务价值组合结构类型的求取提供参考体系。本研究中有 6 种生态系统服务价值类型,故理论上最多可以建立 6 种组合的生态系统服务价值类型,各假设的组合类型如表 4。同时,由于地貌特征对生态系统服务价值的影响较大,且鄱阳湖流域土地利用类型中林地占比例超过一半,依据上述分析得到的生态系统服务价值类型林地的比例将会很大,不利于对不同流域生态系统服务价值类型的分析,故这里基于 DEM 数据计算鄱阳湖流域的坡度,并将坡度按小于等于 5°(Ⅰ)、5—10°(Ⅱ)、10—15°(Ⅲ)、15—20°(Ⅳ)、20—25°(Ⅴ)、大于 25°(Ⅵ) 分为 6 个等级,在计算各子流域内土地利用类型的生态系统服务价值结构同时,计算各子流域内坡度类型的组合结构类型。

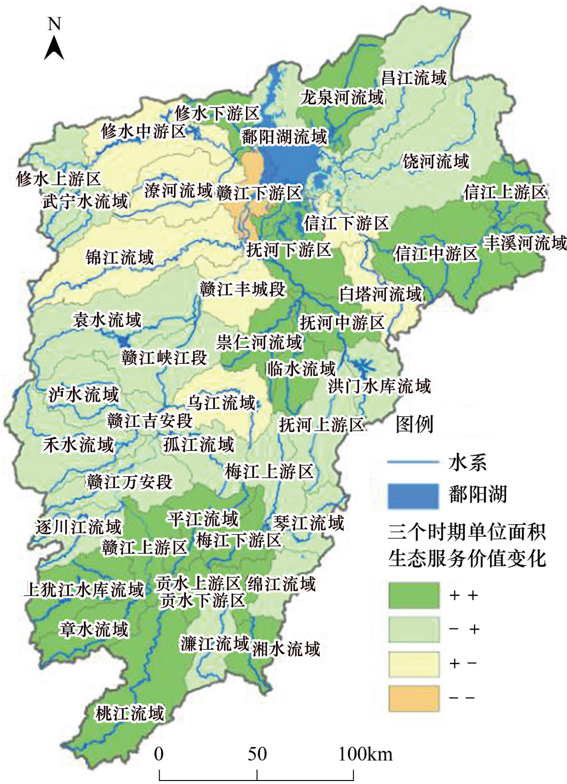


图 1　单位面积生态系统服务价值变化图

Fig.1　The map of per unit area ecosystem service value variation

图中"++"表示 1990—2000—2008 三个时期持续增加;"-+"表示 1990—2000 减少,2000—2008 增加;"+-"表示 1990—2000 增加,2000—2008 减少;"--"表示 1990—2000—2008 持续减少

2.2　威弗组合指数计算

计算子流域各组合结构分类下的威弗组合指数,这里采用最小距离法计算实际结构类型与假设结构类型的差异。最小距离越小,反映实际结构类型与假设结构类型越相近。

$$N_i = \sum_{j=1}^{6} (T_{ij} - T'_{ij})^2 \qquad (2)$$

式中,N_i 为子流域内第 i 类组合结构类型的威弗组合指数,T_{ij}、T'_{ij} 为分别为子流域内第 i 类组合结构类型各类别的实际比例与假设比例。

表 4　组合结构类型假设比例分布矩阵

Table 4　Assuming ratio distribution matrix of combination structure type

组合结构分类 Composite structure classification	各类型的假设比例 All kinds of assumptions					
第一类 First class Ⅰ	1.000	0	0	0	0	0
第二类 Second class Ⅱ	0.5000	0.5000	0	0	0	0
第三类 Third class Ⅲ	0.3333	0.3333	0.3333	0	0	0
第四类 Fourth class Ⅳ	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500	0	0
第五类 Fifth class Ⅴ	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0
第六类 Sixth class Ⅵ	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667

2.3　组合结构类型求取

分别比较子流域内生态系统服务价值与坡度的 6 类结构类型的威弗组合指数,找出最小值。威弗组合指数最小的即为最合理的结构类型。依此求得鄱阳湖流域的生态系统服务价值结构分类结果与坡度类型结构分类结果。表 5—表 7 即为鄱阳湖流域各子流域 1990 年、2000 年与 2008 年的生态系统服务价值结构系统与坡度结构系统。

表 5 鄱阳湖子流域生态系统服务价值与坡度结构(1990)

Table 5 Atlas Structure of ecological service value & slope in Poyang Lake Basin (1990)

组合类型 Composite type	结构类型(生态系统服务价值/坡度) Structure type (ecosystem services value/slope)	面积/km² Area	占全流域面积比例/% Accounts for the basin arearatio	子流域数 Number of sub basin	占全流域个数百分比/% Percentage of total number
林地 Forest Ⅰ	单一结构/单一结构	36385.35	22.67	10.00	22.22
林地 Forest Ⅰ-Ⅱ	单一结构/双重结构	3712.53	2.31	2.00	4.45
林地 Forest Ⅰ-Ⅱ-Ⅲ	单一结构/三重结构	14670.11	9.14	4.00	8.89
林地 Forest Ⅰ-Ⅱ-Ⅲ-Ⅳ	单一结构/四重结构	31708.05	19.76	10.00	22.22
林地 Forest Ⅰ-Ⅲ-Ⅱ-Ⅳ	单一结构/四重结构	7432.44	4.63	1.00	2.22
林地 Forest Ⅱ-Ⅰ-Ⅲ-Ⅳ	单一结构/四重结构	1715.53	1.07	1.00	2.22
林地 Forest Ⅱ-Ⅲ-Ⅰ-Ⅳ	单一结构/四重结构	7215.57	4.50	1.00	2.22
林地 Forest Ⅰ-Ⅱ-Ⅲ-Ⅳ-Ⅴ	单一结构/五重结构	12611.94	7.86	2.00	4.45
林地 Forest Ⅰ-Ⅲ-Ⅱ-Ⅳ-Ⅴ	单一结构/五重结构	5456.35	3.40	1.00	2.22
林地 Forest Ⅰ-Ⅱ-Ⅲ-Ⅳ-Ⅴ-Ⅵ	单一结构/六重结构	4116.84	2.57	1.00	2.22
林地 Forest Ⅰ-Ⅱ-Ⅲ-Ⅳ-Ⅵ-Ⅴ	单一结构/六重结构	9289.55	5.79	2.00	4.45
林地 Forest Ⅰ-Ⅳ-Ⅱ-Ⅲ-Ⅴ-Ⅵ	单一结构/六重结构	2553.97	1.59	1.00	2.22
林地-农用地 Forest-farmland Ⅰ-Ⅱ	双重结构/双重结构	1899.59	1.18	1.00	2.22
林地-农用地 Forest-farmland Ⅰ-Ⅱ-Ⅲ-Ⅳ	双重结构/四重结构	2291.11	1.43	1.00	2.22
林地-农用地 Forest-farmland Ⅱ-Ⅲ-Ⅰ-Ⅳ-Ⅴ	双重结构/五重结构	2635.90	1.64	1.00	2.22
林地-水体 Forest-water Ⅰ-Ⅱ-Ⅲ-Ⅳ	双重结构/四重结构	4303.71	2.68	1.00	2.22
林地-农用地-草地 Forest-farmland-grassland Ⅲ-Ⅳ-Ⅱ-Ⅰ-Ⅴ-Ⅵ	三重结构/六重结构	832.13	0.52	1.00	2.22
农用地-林地-水体 Farmland-forest-water Ⅰ-Ⅱ-Ⅲ-Ⅳ	三重结构/四重结构	3014.48	1.88	1.00	2.22
水体-林地-农用地 Water-forest-farmland	三重结构/四重结构	4778.16	2.98	1.00	2.22
水体-林地-农用地 Water-forest-farmland Ⅰ-Ⅲ-Ⅱ-Ⅳ-Ⅴ	三重结构/五重结构	1603.69	1.00	1.00	2.22
水体-农用地-林地 Water-farmland-forest Ⅳ-Ⅰ-Ⅴ-Ⅲ-Ⅱ-Ⅵ	三重结构/六重结构	2240.17	1.40	1.00	2.22

表 6 鄱阳湖子流域生态系统服务价值结构(2000)

Table 6 Atlas Structure of ecological service value & slope in Poyang Lake Basin (2000)

组合类型 Composite type	结构类型(生态系统服务价值/坡度) Structure type (ecosystem services value/slope)	面积/km² Area	占全流域面积比例/% Accounts for the basin arearatio	子流域数 Number of sub basin	占全流域个数百分比/% Percentage of total number
林地 Forest Ⅰ	单一结构/单一结构	36385.35	22.67	10.00	22.22
林地 Forest Ⅰ-Ⅱ	单一结构/双重结构	3712.53	2.31	2.00	4.45
林地 Forest Ⅰ-Ⅱ-Ⅲ	单一结构/三重结构	14670.11	9.14	4.00	8.89
林地 Forest Ⅰ-Ⅱ-Ⅲ-Ⅳ	单一结构/四重结构	33999.16	21.19	11.00	24.45
林地 Forest Ⅰ-Ⅲ-Ⅱ-Ⅳ	单一结构/四重结构	7432.44	4.63	1.00	2.22
林地 Forest Ⅱ-Ⅰ-Ⅲ-Ⅳ	单一结构/四重结构	1715.53	1.07	1.00	2.22
林地 Forest Ⅱ-Ⅲ-Ⅰ-Ⅳ	单一结构/四重结构	7215.57	4.50	1.00	2.22
林地 Forest Ⅰ-Ⅱ-Ⅲ-Ⅳ-Ⅴ	单一结构/五重结构	12611.94	7.86	2.00	4.45
林地 Forest Ⅰ-Ⅲ-Ⅱ-Ⅳ-Ⅴ	单一结构/五重结构	5456.35	3.40	1.00	2.22
林地 Forest Ⅱ-Ⅲ-Ⅰ-Ⅳ-Ⅴ	单一结构/五重结构	2635.90	1.64	1.00	2.22

续表

组合类型 Composite type	结构类型(生态系统服务价值/坡度) Structure type (ecosystem services value/slope)	面积/km² Area	占全流域面积比例/% Accounts for the basin arearatio	子流域数 Number of sub basin	占全流域个数百分比/% Percentage of total number
林地 Forest Ⅰ-Ⅱ-Ⅲ-Ⅳ-Ⅴ-Ⅵ	单一结构/六重结构	4116.84	2.57	1.00	2.22
林地 Forest Ⅰ-Ⅱ-Ⅲ-Ⅳ-Ⅵ-Ⅴ	单一结构/六重结构	9289.55	5.79	2.00	4.45
林地 Forest Ⅰ-Ⅳ-Ⅱ-Ⅲ-Ⅴ-Ⅵ	单一结构/六重结构	2553.97	1.59	1.00	2.22
林地-农用地 Forest-farmland Ⅰ-Ⅱ-Ⅲ-Ⅳ	双重结构/四重结构	3014.48	1.88	1.00	2.22
林地-水体 Forest-water Ⅰ-Ⅱ	双重结构/两重结构	1899.59	1.18	1.00	2.22
林地-水体 Forest-water Ⅰ-Ⅱ-Ⅲ-Ⅳ	双重结构/四重结构	4303.71	2.68	1.00	2.22
林地-农用地-水体 Forest-farmland-water Ⅲ-Ⅳ-Ⅱ-Ⅰ-Ⅴ-Ⅵ	三重结构/六重结构	832.13	0.52	1.00	2.22
林地-水体-农用地 Forest-water-farmland Ⅰ-Ⅲ-Ⅱ-Ⅳ-Ⅴ	三重结构/五重结构	1603.69	1.00	1.00	2.22
水体-林地-农用地 Water-forest-farmland Ⅰ-Ⅱ-Ⅲ-Ⅳ	三重结构/四重结构	4778.16	2.98	1.00	2.22
水体-林地-农用地 Water-forest-farmland Ⅳ-Ⅰ-Ⅴ-Ⅲ-Ⅱ-Ⅵ	三重结构/六重结构	2240.17	1.40	1.00	2.22

表 7　鄱阳湖子流域生态系统服务价值结构(2008)

Table 7　Atlas Structure of ecological service value & slope in Poyang Lake Basin (2008)

组合类型 Composite type	结构类型(生态系统服务价值/坡度) Structure type (ecosystem services value/slope)	面积/km² Area	占全流域面积比例/% Accounts for the basin arearatio	子流域数 Number of sub basin	占全流域个数百分比/% Percentage of total number
林地 Forest Ⅰ	单一结构/单一结构	36385.35	22.67	10.00	22.22
林地 Forest Ⅰ-Ⅱ	单一结构/双重结构	3712.53	2.31	2.00	4.45
林地 Forest Ⅰ-Ⅱ-Ⅲ	单一结构/三重结构	14670.11	9.14	4.00	8.89
林地 Forest Ⅰ-Ⅱ-Ⅲ-Ⅳ	单一结构/四重结构	31708.05	19.76	10.00	22.22
林地 Forest Ⅰ-Ⅲ-Ⅱ-Ⅳ	单一结构/四重结构	7432.44	4.63	1.00	2.22
林地 Forest Ⅱ-Ⅰ-Ⅲ-Ⅳ	单一结构/四重结构	1715.53	1.07	1.00	2.22
林地 Forest Ⅱ-Ⅲ-Ⅰ-Ⅳ	单一结构/四重结构	7215.57	4.50	1.00	2.22
林地 Forest Ⅰ-Ⅱ-Ⅲ-Ⅳ-Ⅴ	单一结构/五重结构	12611.94	7.86	2.00	4.45
林地 Forest Ⅰ-Ⅲ-Ⅱ-Ⅳ-Ⅴ	单一结构/五重结构	5456.35	3.40	1.00	2.22
林地 Forest Ⅰ-Ⅱ-Ⅲ-Ⅳ-Ⅴ-Ⅵ	单一结构/六重结构	4116.84	2.57	1.00	2.22
林地 Forest Ⅰ-Ⅱ-Ⅲ-Ⅳ-Ⅵ-Ⅴ	单一结构/六重结构	9289.55	5.79	2.00	4.45
林地 Forest Ⅰ-Ⅳ-Ⅱ-Ⅲ-Ⅴ-Ⅵ	单一结构/六重结构	2553.97	1.59	1.00	2.22
林地-农用地 Forest-farmland Ⅰ-Ⅱ-Ⅲ-Ⅳ	双重结构/四重结构	2291.11	1.43	1.00	2.22
林地-农用地 Forest-farmland Ⅰ-Ⅱ-Ⅲ-Ⅳ	双重结构/五重结构	2635.90	1.64	1.00	2.22
林地-水体 Forest-water Ⅰ-Ⅱ-Ⅲ-Ⅳ	双重结构/四重结构	4303.71	2.68	1.00	2.22
林地-水体-农用地 Forest-water-farmland Ⅰ-Ⅱ	三重结构/双重结构	1899.59	1.18	1.00	2.22
农用地-林地-水体 Farmland-forest-water Ⅰ-Ⅱ-Ⅲ-Ⅳ	双重结构/四重结构	3014.48	1.88	1.00	2.22

续表

组合类型 Composite type	结构类型(生态系统服务价值/坡度) Structure type (ecosystem services value/slope)	面积/km² Area	占全流域面积比例/% Accounts for the basin arearatio	子流域数 Number of sub basin	占全流域个数百分比/% Percentage of total number
水体-林地-农用地 Water-forest-farmland Ⅰ-Ⅲ-Ⅱ-Ⅳ-Ⅴ	三重结构/五重结构	1603.69	1.00	1.00	2.22
水体-农用地-林地 Water-farmland-forest Ⅰ-Ⅱ-Ⅲ-Ⅳ	三重结构/四重结构	4778.16	2.98	1.00	2.22
水体-农用地-林地 Water-farmland-forest Ⅳ-Ⅰ-Ⅴ-Ⅲ-Ⅱ-Ⅵ	三重结构/六重结构	2240.17	1.40	1.00	2.22
林地-农用地-水体-草地 Farmland-forest-water -grassland Ⅲ-Ⅳ-Ⅱ-Ⅰ-Ⅴ-Ⅵ	四重结构/六重结构	832.13	0.52	1.00	2.22

在 GIS 技术的支持下,依据鄱阳湖流域生态系统服务价值结构类型结果,得到鄱阳湖生态系统服务价值图谱结构分布图(图 2—图 4)。

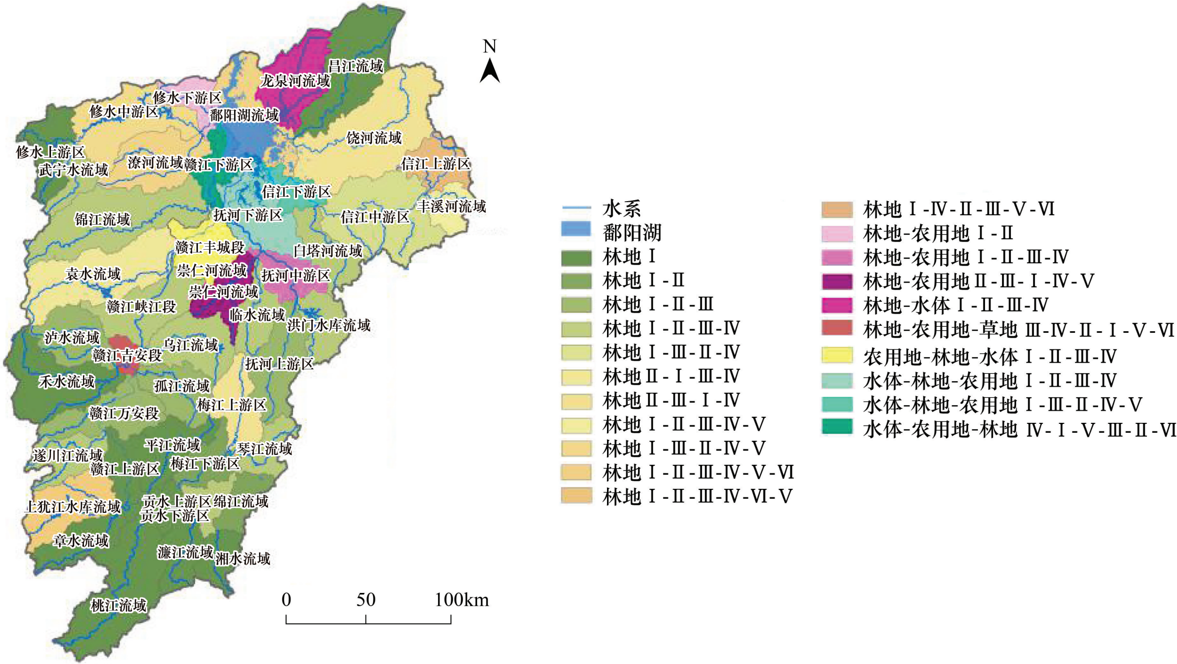


图 2 生态系统服务价值结构分布图(1990)

Fig.2 Ecosystem services value structure distribution(1990)

2.4 生态系统服务价值结构变化模式构建

对 3 个时期的鄱阳湖流域生态系统服务价值结构图谱进行地图代数叠加运算,得到 1990 年—2000 年—2008 年生态系统服务价值结构变化模式。鄱阳湖流域生态系统服务价值结构变化模式可以概括为 3 种模式:不变型模式:两个时期内生态系统服务价值结构均未发生变化;反复变化型:生态系统服务价值结构在 1990—2000 年发生转变后,在 2000—2008 年又变回 1990 年时的类型;持续变化型:生态系统服务价值结构在 1990—2008 年两个时期内持续发生变化(表 8)。

依据鄱阳湖流域生态系统服务价值结构变化模式结果,得到鄱阳湖生态系统服务价值图谱结构变化模式分布图(图 5)。

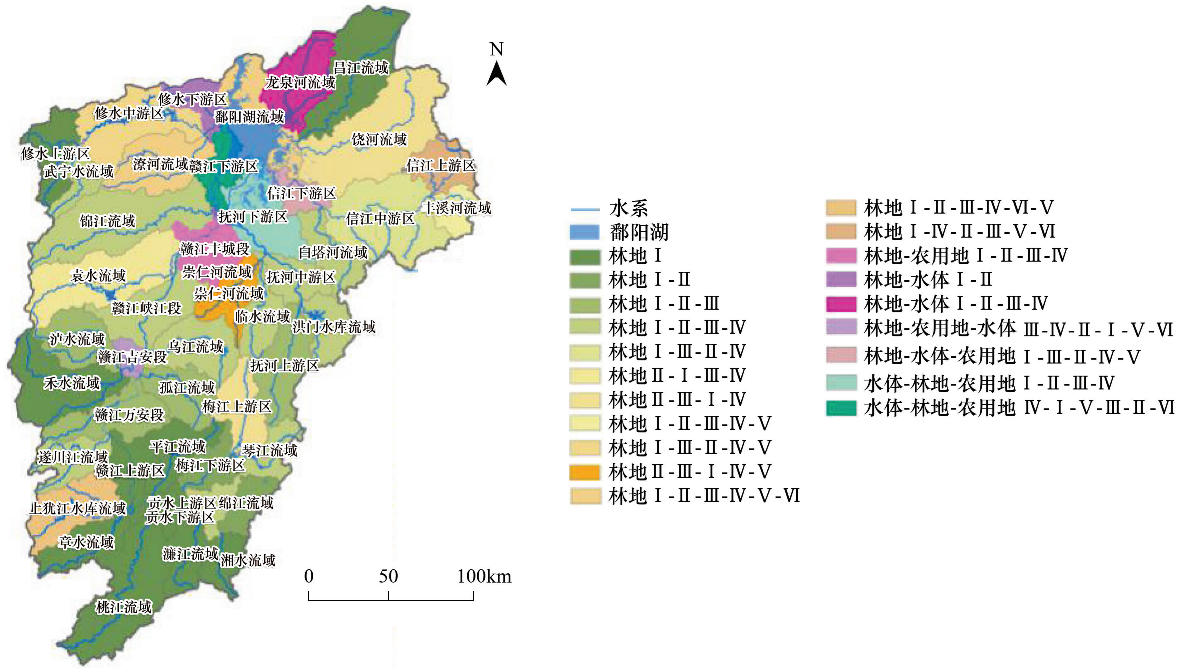


图 3　生态系统服务价值结构分布图(2000)

Fig.3　Ecosystem services value structure distribution (2000)

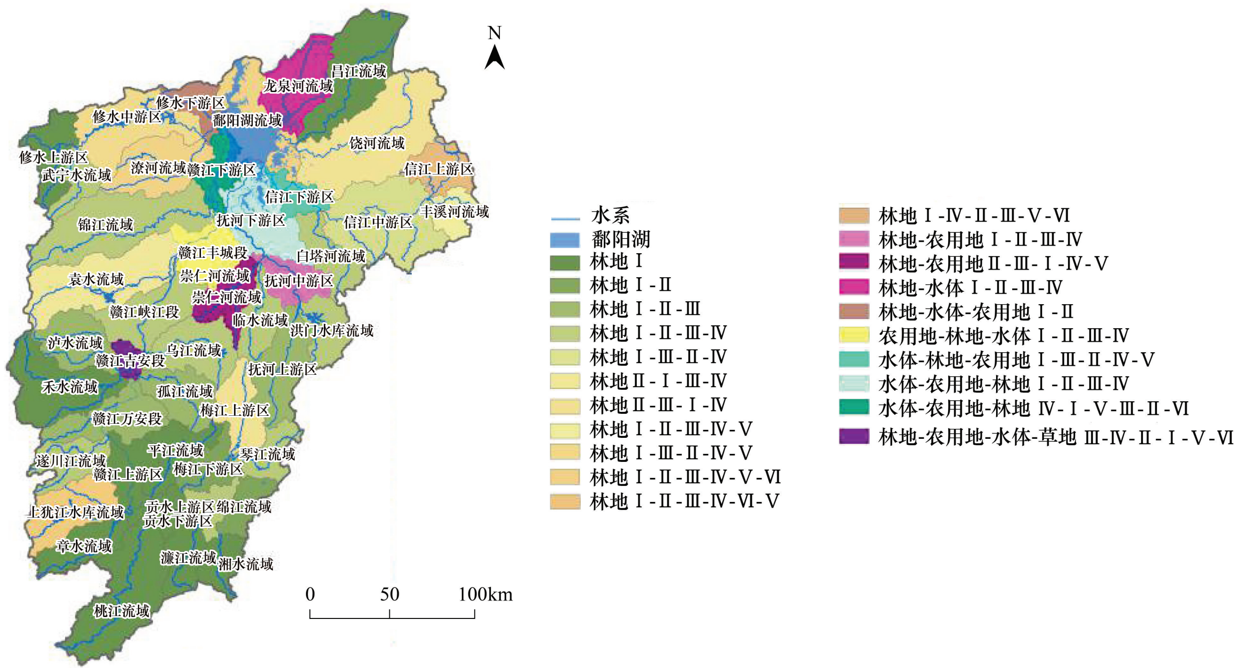


图 4　生态系统服务价值结构分布图(2008)

Fig.4　Ecosystem services value structure distribution (2008)

3　分析与评价

3.1　生态系统服务价值分析

由表 3 与图 1 可以分析出,在全流域尺度上,2000 年和 2008 年的单位面积生态系统服务价值都较前一

个时期有提高,2000 年比 1990 年上升了 166 元/hm^2,提高了 1.9%,2008 年比 2000 年上升了 1587 元/hm^2,提高了 18.2%。单位面积生态系统服务价值空间分布方面,鄱阳湖流域中部以及赣江中游部分地区,单位面积生态系统服务价值相对较低,鄱阳湖流域的北部与南部则相对较高。

表 8 生态系统服务价值组合结构变化模式

Table 8 Ecosystem service value combination structure changing pattern

生态系统服务价值结构变化模式 Ecosystem service value structure change model	变化模式编码 Change pattern encoding	子流域名称 Name of sub basin	面积/km^2 Area	占全流域面积比/% Accounts for the basin area ratio	各模式下占全流域面积比例汇总/% The mode of the basin area ratio
不变型 Type of the same	0	——	145950.10	90.95	90.95
反复变化型	1-2-1	赣江下游区	2,240.17	1.40	7.35
Type of change over	3-4-3	信江下游区	1,603.69	1.00	
and over again	5-6-5	抚河中游区	2,291.11	1.43	
	7-8-7	赣江丰城段	3,014.48	1.88	
	9-10-9	崇仁河流域	2,635.90	1.64	
持续变化型	11-12-15	赣江吉安段	832.13	0.52	1.70
Type of continuous change	13-14-16	修水下游区	1,899.59	1.18	

* 编码说明:1:水地-农用地-林地Ⅳ-Ⅰ-Ⅴ-Ⅲ-Ⅱ-Ⅵ; 2:水体-林地-农用地Ⅳ-Ⅰ-Ⅴ-Ⅲ-Ⅱ-Ⅵ; 3:水体-林地-农用地Ⅰ-Ⅲ-Ⅱ-Ⅳ-Ⅴ; 4:林地-水体-农用地Ⅰ-Ⅲ-Ⅱ-Ⅳ-Ⅴ; 5:林地-农用地Ⅰ-Ⅱ-Ⅲ-Ⅳ;6:林地Ⅰ-Ⅱ-Ⅲ-Ⅳ;7:林地-农用地Ⅰ-Ⅱ-Ⅲ-Ⅳ;8:农用地-林地-水体Ⅰ-Ⅱ-Ⅲ-Ⅳ;9:林地-农用地Ⅱ-Ⅲ-Ⅰ-Ⅳ-Ⅴ;10:林地Ⅱ-Ⅲ-Ⅰ-Ⅳ-Ⅴ;11:林地-农用地-草地Ⅲ-Ⅳ-Ⅱ-Ⅰ-Ⅴ-Ⅵ;12:林地-农用地-水体Ⅲ-Ⅳ-Ⅱ-Ⅰ-Ⅴ-Ⅵ;13:林地-农用地Ⅰ-Ⅱ;14:林地-水体Ⅰ-Ⅱ;15: 林地-农用地-水体-草地Ⅲ-Ⅳ-Ⅱ-Ⅰ-Ⅴ-Ⅵ;16:林地-水体-农用地Ⅰ-Ⅱ

在子流域尺度上,对 1990 年到 2000 年这段时期,单位面积生态系统服务价值提升的子流域有 33 个,占 73.33%,下降的子流域有 12 个,占比 26.67%;单位面积生态系统服务价值提升超过 1000 元/hm^2 的子流域有 5 个,分别是赣江丰城段、赣江吉安段、赣江下游区、潦河流域和遂川江流域,提升不超过 1 万元/hm^2 的子流域有 28 个,占提升总流域数的 84.8%;在 12 个单位面积生态系统服务价值下降的子流域中,赣江万安段减少最多,为 1084 元/hm^2。

对 2000 年到 2008 年这段时期,单位面积生态系统服务价值提升的子流域有 43 个,占 95.6%,其中,有 6 个子流域提升超过 2000 元/hm^2,占提升总流域数的 13.3%。下降的子流域只有 2 个,占比 4.4%,减少均不超过 1600 元/hm^2。

对 1990 年到 2008 年整个时期分析,所有子流域的单位面积生态系统服务价值都有所提升,提高最多的是遂川江流域,提升了 3089 元/hm^2,提升超过 1500 元/hm^2 的子流域有 16 个,占比 35.6%。

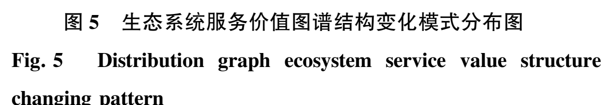


图 5 生态系统服务价值图谱结构变化模式分布图

Fig. 5 Distribution graph ecosystem service value structure changing pattern

3.2 生态系统服务价值组合类型分析

由表 5—表 7 与图 2—图 4 可以分析出,鄱阳湖流域的生态系统服务价值组合结构以林地为主,农用地、水体为辅,其它类型除草地在个别流域有分布,其它则没有。坡度组合结构以小于等于 5°(Ⅰ)为主,5—10°(Ⅱ)、10—15°(Ⅲ)为辅,其它坡度类型则较少。

林地为主的生态系统服务价值结构类型在 3 个时期占鄱阳湖流域面积与流域个数均超过 90%,其中,有 80%的流域是单一的林地类型的生态系统服务价值结构。林地为主,其它为辅的生态系统服务价值结构类型,为辅的类型主要为农用地与水体,占鄱阳湖流域面积与流域个数在 10%左右。流域坡度结构方面,林地为的生态系统服务价值结构类型主要以小于等于 5°(Ⅰ)为主,其它坡度类型为辅,在 3 个时期以小于等于 5°(Ⅰ)为首要坡度类型的林地为的生态系统服务价值结构类型占鄱阳湖流域面积与流域个数在 85%左右。

农用地为主的生态系统服务价值类型与水体为主的生态系统服务价值类型在组合结构类型与分布区域两方面均较为相近,主要以农用地、水体、林地组合结构类型为主,主要分布在鄱阳湖流域中部,农用地为主的生态系统服务价值类型分布在赣江丰城段,水体为主的生态系统服务价值类型分布在鄱阳湖环湖区周边的赣江、信江、抚河的下流区域,两者在 1990 年和 2008 年占鄱阳湖流域面积与流域个数 8%左右,在 2000 年占 4%;坡度组合结构方面以小于等于 5°(Ⅰ)为主,以 5—10°(Ⅱ)为辅。

3.3　生态系统服务价值结构类型分析

鄱阳湖流域生态系统服务价值结构类型主要有 4 种类型,其中,单一结构类型所占比例最大,三重结构类型与双重结构类型次之,四重结构类型则只在个别流域有分布;单一结构类型主要以林地为主,三重结构类型主要以林地、水体、农用地为主,双重结构类型主要以林地、水体,或林地、农用地为主。在空间分布方面,单一结构类型在鄱阳湖流域大部分区域均有分布,而三重结构类型与双重结构类型主要分布在鄱阳湖环湖区及周边区域。坡度结构类型则 6 种结构类型均有,除三重结构类型在 3 个时期分布均较少外,其它 5 种结构类型分布均较多。其中,单一结构类型以小于等于 5°(Ⅰ)为主,双重结构类型以小于等于 5°(Ⅰ)、5—10°(Ⅱ)组合为主,四重结构类型以小于等于 5°(Ⅰ)、5—10°(Ⅱ)、10—15°(Ⅲ)、15—20°(Ⅳ)组合为主,五重结构类型以小于等于 5°(Ⅰ)、5—10°(Ⅱ)、10—15°(Ⅲ)、15—20°(Ⅳ)、20—25°(Ⅴ)为主。

3.4　生态系统服务价值组合结构变化分析

鄱阳湖流域生态系统服务价值组合结构变化的 3 种模式中,以不变型为主,占鄱阳湖全流域面积的 90%;反复变化型主要分布在鄱阳湖流域中南部的赣江中下游,信江下游与抚河中游,占鄱阳湖全流域面积的 7%,生态系统服务价值组合结构主要由农用地、水体、林地 3 种类型构成的三重结构类型与双重结构类型为主。持续变化型占全流域面积的比例较低,主要分布在赣江中游与修水下游,生态系统服务价值组合结构也主要由农用地、水体、林地 3 种类型构成的三重结构类型与双重结构类型为主。

3.5　促进流域可持续发展建议

从全流域的角度分析,鄱阳湖流域 3 个时期可持续发展水平是逐步提高的,原因在于全流域林地、水域、建设用地生态系统服务价值在逐年增加,这说明鄱阳湖流域在退耕还林,退耕还湖等生态保护工作执行较好,可持续发展总体水平较好,但是也存在一些问题,如农用地、未利用地生态系统服务价值降低,建设用地生态系统服务价值增加,这说明鄱阳湖流域的社会经济的发展,建设用地的扩张占用了大量的农用地与未利用地,不太利于生态环境的保护。故对于全流域,促进可持续发生水平向更高水平发展要注重两个方面:一方面继续执行退耕还林,退耕还湖工程,是鄱阳湖流域更多的山林、湖区恢复原貌;另一方面,提高建设用地集约利用水平,严格控制建设用地的增加,尤其是对农用地等的占用。

从子区域的角度分析,大部分区域可持续发展水平较高,且呈现上升趋势,但还存在部分区域,可持续发展水平较低,且可持续发展水平呈下降趋势,这些区域主要位于鄱阳湖流域的中部。分析原因在于这些区域地势平坦,社会经济活动活跃,在生态系统服务价值组成方面,农用地、建设用地所占比例要较其它区域高,而林地、草地所占比例较其它区域低,且农用地、建设用地所在比例在持续增高,林地、草地所占比例在持续降低。然而林地与草地单位面积生态系统服务价值要高于农用地与建设用地,故这些区域生态系统服务价值偏低,可持续发展水平较差,且在 3 个时期内,农用地与建设用地生态系统服务价值量的增加,低于林地、草地生态系统服务价值量的降低,因此,对于这些区域,促进可持续发生水平朝向有利的方向发展应该控制建设用地、农用地对林地、草地的占用,严格执行退耕还林、还草工程,保护生态环境。

依据生态系统服务价值结构,鄱阳湖流域可以分为两大区域:环鄱阳湖平原区以及环湖区以外的山地丘陵区。山地丘陵区主要以林地主的生态服务结构类型,坡度主要以小于15°的坡度组合类型为主,此区域森林覆盖率高,是环鄱阳湖生态环境维护较好的地区,对于这些区域,应加大生态环境的维护,进行天然林资源保护,对于经济的发展,要发展林业经济,此外,还可以引进一些对环境质量要求较高的企业,促进当地经济的发展。

环鄱阳湖平原区是鄱阳湖流域生态系统服务价值结构最多样化的地区,主要以林地、水体、农用地组合的生态服务类型为主,也是鄱阳湖流域社会经济活动最为活跃,对于这些区域,发展生态经济是实现绿色崛起的必由之路。一方面需要淘汰高污染、高消耗的项目,推进资源消耗少,污染排放小,科技含量高的项目。另一方面,通过调整土地利用类型调整区域生态价值服务结构类型,使之朝有利于资源可持续利用的方向转变。对于以农业地为主的生态系统服务价值类型区,应减少化肥农药的使用,要以生态农业为主;对于以水体为主的生态系统服务价值结构类型,要保护水质,防治水污染与富营养化,保护水域生态平衡,使湖区经济社会发展与生态环境保护共同发展。

4 小结

基于生态系统服务价值分析方法,以鄱阳湖全流域为研究区,从全流域整体与子区域两个角度,计算了1990年、2000年、2008年3个时期的流域生态系统服务价值量。基于韦弗组合指数,求出了鄱阳湖流域1990年、2000年、2008年3个时期的生态系统服务价值结构类型。

从全流域的角度,鄱阳湖流域3个时期生态系统服务价值总量是逐年增加的,全流域可持续发展水平逐步增加。从子区域的角度,大部分区域生态系统服务价值较高,可持续发生水平较好,且呈现良性发展趋势,但鄱阳湖流域的中部地区生态系统服务价值较低,可持续发展水平较差,且呈现不良发展趋势。从生态系统服务价值组合角度,鄱阳湖流域的生态系统服务价值组合类型以林地、农用地、水体三类为主,坡度类型以小于15°的3种坡度类型为主。结构类型方面,鄱阳湖流域的生态系统服务价值结构类型以单重结构类型为主,以双重结构类型与三重结构类型为辅,坡度结构类型方面,除三重结构类型较少外,其它五种类型均较多。

为促进流域可持续发展向更高水平发展,从全流域角度,应该继续执行退耕还林、还湖工程,严格控制建设用地的增加,尤其是对耕地等的占用。从子区域的角度,对鄱阳湖流域的中部地区应该控制建设用地与农用地对林地、草地的占用,严格执行退耕还林、还草工程,保护生态环境。从生态系统服务价值结构角度,对于山地丘陵区,应该加大对生态环境的维护,进行天然林资源的保护,并且合理的发展林业经济以促进经济发展;对于环鄱阳湖平原区,应该推进资源消耗少,污染排放小,高科技产业,并且对以建设用地、农业地、水体为主的生态价值服务类型地区,要分别采取相应的措施,促进湖区生态环境保护与经济社会的共同发展。

参考文献(References):

[1] Jenkins W A, Murray B C, Kramer R A, Faulkner S P. Valuing ecosystem services from wetlands restoration in the Mississippi Alluvial Valley. Ecological Economics, 2010, 69(5): 1051-1061.

[2] de Groot R, Brander L, van der Ploeg S, Costanza R, Bernard F, Braat L, Christie M, Crossman N, Ghermandi A, Hein L, Hussain S, Kumar P, McVittie A, Portela R, Rodriguez L C, ten Brink P, van Beukering P. Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. Ecosystem Services, 2012, 1(1): 50-61.

[3] 吴大千, 刘建, 贺同利, 王淑军, 王仁卿. 基于土地利用变化的黄河三角洲生态服务价值损益分析. 农业工程学报, 2009, 25(8): 256-261.

[4] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature, 1997, 387(6630): 253-260.

[5] 岳耀杰, 闫维娜, 王秀红, 申元村, 仇梦梦, 周兰, 栗健. 区域生态退耕对生态系统服务价值的影响——以宁夏盐池为例. 干旱区资源与环境, 2014, 28(2): 60-67.

[6] Martínez M L, Pérez-Maqueo O, Vázquez G, Castillo-Campos G, García-Franco J, Mehltreter K, Equihua M, Landgrave R. Effects of land use

change on biodiversity and ecosystem services in tropical montane cloud forests of Mexico. Forest Ecology and Management, 2009, 258(9): 1856-1863.

[7] Di Sabatino A, Coscieme L, Vignini P, Cicolani B. Scale and ecological dependence of ecosystem services evaluation: spatial extension and economic value of freshwater ecosystems in Italy. Ecological Indicators, 2013, 32: 259-263.

[8] Radford K G, James P. Changes in the value of ecosystem services along a rural – urban gradient: a case study of Greater Manchester, UK. Landscape and Urban Planning, 2013, 109(1): 117-127.

[9] Li J C, Wang W L, Hu G Y, Wei Z H. Changes in ecosystem service values in Zoige Plateau, China. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2010, 139(4): 766-770.

[10] Yang W, Chang J, Xu B, Peng C H, Ge Y. Ecosystem service value assessment for constructed wetlands: a case study in Hangzhou, China. Ecological Economics, 2008, 68(1/2): 116-125.

[11] Fanny B, Nicolas D, Sander J, Erik G B, Marc D.How (not) to perform ecosystem service valuations: *pricing gorillas in the mist*. Biodiversity and Conservation, 2015, 24(1): 187-197.

[12] 刘海, 王兴玲, 陈晓玲, 陆建忠. 利用地学信息图谱的江西省生态服务价值结构研究. 武汉大学学报: 信息科学版, 2012, 37(1): 118-121.

[13] 陈阳, 张建军, 杜国明, 付梅臣, 刘凌露. 三江平原北部生态系统服务价值的时空演变. 生态学报, 2015, 35(18): 6157-6164.

[14] 李想, 李闯, 王凤友, 王诗阳, 王雪. 大连中心城区绿地系统生态服务价值时空分异特征研究. 地理科学, 2014, 34(3): 302-308.

[15] 陈美球, 赵宝苹, 罗志军, 黄宏胜, 魏晓华, 吕添贵, 许莉. 基于 RS 与 GIS 的赣江上游流域生态系统服务价值变化. 生态学报, 2013, 33(9): 2761-2767.

[16] 陈国阶, 何锦峰, 涂建军. 长江上游生态服务功能区域差异研究. 山地学报, 2005, 23(4): 406-412.

[17] 王兵, 王丹. 江西广丰森林生态服务及其价值研究. 江西科学, 2010, 28(5): 630-637, 687-687.

[18] 熊凯, 孔凡斌. 基于生态系统服务功能价值的鄱阳湖湿地生态补偿标准研究. 农林经济管理学报, 2014, 13(6): 669-677.

[19] 倪才英, 曾珩, 汪为青. 鄱阳湖退田还湖生态补偿研究(I)——湿地生态系统服务价值计算. 江西师范大学学报: 自然科学版, 2009, 33(6): 737-742.

[20] Chen X L, Bao S M, Li H, Cao X B, Guo P, Wu Z Y, Fu W J, Zhao H M. LUCC impact on sediment loads in subtropical rainy areas. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2007, 73(3): 319-327.

[21] Liu H, Xia H Q, Zhou B. Land use information extraction and spatio-temporal variation analysis of Poyang Lake Basin based on remote sensing//Proceedings of SPIE 8921, MIPPR 2013: Remote Sensing Image Processing, Geographic Information Systems, and Other Applications. Wuhan, China: SPIE, 2013.

[22] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 肖玉, 陈操. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法. 自然资源学报, 2008, 23(5): 911-919.

[23] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 陈文辉, 李士美. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254.

[24] 丁庆福, 王军邦, 齐述华, 叶辉, 黄玫, 徐跃通, 应天玉, 陶健. 江西省植被净初级生产力的空间格局及其对气候因素的响应. 生态学杂志, 2013, 32(3): 726-732.

[25] 黄麟, 邵全琴, 刘纪远. 江西省森林碳蓄积过程及碳源/汇的时空格局. 生态学报, 2012, 32(10): 3010-3020.

[26] 孙成明, 刘涛, 田婷, 郭斗斗, 王力坚, 陈瑛瑛, 李菲, 李建龙. 基于 MODIS 的南方草地 NPP 遥感估算与应用. 草业学报, 2013, 22(5): 11-17.